

УДК 630*

Е. А. Леонов, Д. В. Клоков

Белорусский государственный технологический университет

**ОБОСНОВАНИЕ МЕЖОПЕРАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ СЫРЬЯ
НА ЛЕСОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕРМИНАЛАХ С УЧЕТОМ ЗАГРУЗКИ
ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В статье приведено теоретическое исследование влияния величины межоперационного запаса древесного сырья на степень загрузки основного технологического оборудования, функционирующего в условиях лесоэнергетических терминалов (ЛЭТ).

Разработанная методология базируется на применении теории массового обслуживания. В такой модели имеют место два типа потоков: интенсивность подачи сырья в обработку и интенсивность измельчения сырья.

Целью теоретических исследований являлось установление рациональных параметров относительной величины межоперационных запасов древесного сырья на участке его измельчения на топливную щепу, а также влияние данного параметра на загрузку основного технологического оборудования. Разработанная методология позволяет определять: оптимальную относительную величину межоперационного запаса древесного сырья в условиях лесоэнергетических терминалов с учетом оптимальной загрузки применяемого оборудования.

Ключевые слова: модель, рубильная машина, вероятность, технический отказ, параметры.

E. A. Leonov, D. V. Klovov

Belarusian State Technological University

**JUSTIFICATION OF INTEROPERATIVE RESERVES OF RAW MATERIAL
AT FOREST ENERGY TERMINALS WITH THE ACCOUNT OF LOADING
OF THE MAIN TECHNOLOGICAL EQUIPMENT**

The article presents a theoretical study of the influence of the amount of interoperative stock of wood raw materials on the degree of loading of the main technological equipment operating in the conditions of forest energy terminals (FET).

The developed methodology is based on the application of queuing theory. In this model, there are two types of flows: the intensity of supply of raw materials to processing and the intensity of the crushing of raw materials.

The aim of the theoretical studies was to establish rational parameters for the relative value of the inter-operative wood raw material reserves in the area of its grinding into fuel chips, as well as the influence of this parameter on the loading of the main technological equipment. The developed methodology makes it possible to determine: the optimum relative value of the inter-operative stock of wood raw materials in the conditions of forest energy terminals, taking into account the optimum utilization of the equipment used.

Key words: model, chipper, probability, technical failure, parameters.

Введение. Исторически сложилось так, что Беларусь зависит от импорта энергоресурсов. Ее устойчивое жизнеобеспечение может быть достигнуто прежде всего путем диверсификации производства энергии с максимальным вовлечением местных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а также снижением удельного энергопотребления за счет сберегающих мероприятий [1]. Государственные программы по удовлетворению потребностей в тепловой и электрической энергии за счет использования местных ТЭР, реализованные в нашей стране, являются основным движущим фактором развития сектора производства энергии из древесного топлива.

В настоящее время в Беларуси в различных министерствах и ведомствах, а также на част-

ных предприятиях на древесном топливе работают свыше 3000 котлов мощностью от 0,012 до 20 МВт, а также 11 мини-ТЭЦ с установленной электрической мощностью от 1,2 до 4,23 МВт и тепловой мощностью от 6,5 до 16,4 МВт. Ввод в действие Вилейской мини-ТЭЦ (16,0 тыс. т у. т., или 60 тыс. пл. м³ древесины), котельной «Осиповичи» (10,2 тыс. т у. т., или 38,7 тыс. пл. м³ древесины), Белорусской ГРЭС (8,25 тыс. т у. т., или 22,2 тыс. пл. м³ древесины), мини-ТЭЦ ОАО «Мостовдрев» (10 тыс. т у. т., или 38 тыс. пл. м³ древесины), Пинской ТЭЦ (23,1 тыс. т у. т., или 88 тыс. пл. м³ древесины), Пружанской мини-ТЭЦ (22,0 тыс. т у. т., или 83,4 тыс. пл. м³ древесины), Петриковской мини-ТЭЦ (7,0 тыс. т у. т., или 26,3 тыс. пл. м³ древесины), котельной

«Россоны» (8,0 тыс. т у. т., или 30,3 тыс. пл. м³ древесины) и других объектов, работающих на биотопливе, требует решения задач не только гарантированного обеспечения их древесным топливом, но и эффективного процесса его производства.

В Беларуси с 2005 г. начала реализовываться стратегия, предусматривающая установку энергоагрегатов с автоматизированной загрузкой, что привело к устойчивому спросу на древесную щепу. В 2016 г. производственные мощности предприятий системы Минлесхоза (основных поставщиков древесного топлива на энергообъекты) составили 5785,7 тыс. м³ древесного топлива, в том числе 1745,8 тыс. м³ топливной щепы.

Предусматривается, что использование древесной биомассы, включая низкокачественную древесину, отходы лесозаготовок и деревообработки, будет играть важную роль в выполнении национальных плановых заданий и позволит довести долю местных ТЭР в балансе котельно-печного топлива до 32% в 2020 г. [2]. В качестве сырья для производства топливной щепы к 2020 г. планируется использовать до 7 млн. м³ дров, 0,5 млн. м³ отходов лесозаготовок, около 1,5 млн. м³ отходов деревообработки.

В Беларуси, как показывает практика, обеспечение устойчивого снабжения энергообъекта сырьем возможно путем создания технологически гибкого лесоэнергетического терминала (ЛЭТ), который наилучшим образом отвечает требованию переработки древесного сырья в широком диапазоне размерно-качественных характеристик, возможности его хранения и подготовки к использованию в соответствии с запросами энергообъекта (мини-ТЭЦ) [3, 4].

Под ЛЭТ понимают временное или постоянное техническое сооружение, предназначенное для складирования, измельчения древесной биомассы и бесперебойного снабжения энергообъектов древесным топливом. Отличительные особенности ЛЭТ:

- применение мобильной системы специализированных машин;
- гибкий технологический процесс измельчения сырья, допускающий изменение мест и зон работы машин, хранения сырья и древесного топлива;
- переработка древесного сырья в широком диапазоне размерно-качественных характеристик;
- возможность выбора и изменения места расположения ЛЭТ в транспортно-технологической схеме освоения ресурсов сырья в зависимости от конкретных производственных условий;
- возможность разделения ЛЭТ на несколько составных частей;
- возможность функциональной и территориальной интеграции с другими структурными образованиями (лесными складами, биржами сырья, деревообрабатывающими производствами, энергообъектами и др.).

Пример ЛЭТ, интегрированного с лесным складом ГОЛХУ «Вилейский опытный лесхоз», представлен на рис. 1. Техническая реализуемость концепции ЛЭТ обеспечена применением мобильной системы машин: сортиментовозов производства ОАО «Минский автомобильный завод»; рубильных машин, выпускаемых ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Амкордор»; фронтальных погрузчиков ОАО «Амкордор»; автощеповозов ОАО «Минский автомобильный завод») [3].

Основная часть. Реализация технологических процессов производства топливной щепы в условиях ЛЭТ требует рациональной организации работы применяемых для этих целей машин, в том числе передвижных рубильных машин – основного оборудования в технологической цепочке производства древесного топлива. Рассмотрим модели работы рубильных машин с учетом запасов в условиях ЛЭТ, базирующиеся на теории массового обслуживания.

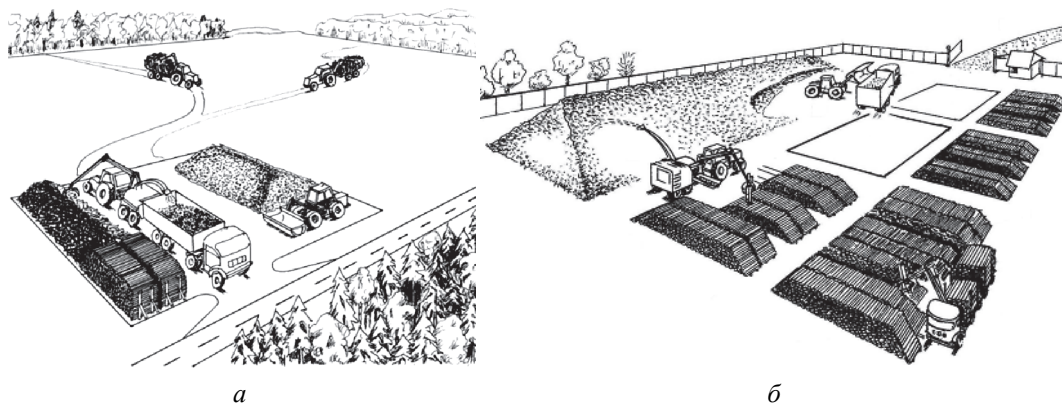


Рис. 1. Технологические схемы функционирования ЛЭТ при производстве топливной щепы:
а – на промежуточном складе; б – на автономном терминале

Для анализа работы на ЛЭТ одной рубильной машины воспользуемся теорией одноплатформенной лесопромышленной системы с запасом [5]. Для такой модели характерны следующие состояния: S_0 – рубильная машина технически исправна, но не работает ввиду отсутствия сырья либо по другим организационным причинам; S_1 – рубильная машина осуществляет измельчение древесного сырья, запас пуст; S_2 – рубильная машина осуществляет измельчение древесного сырья, в запасе одна единица сырья и т. д.; S_{m+1} – рубильная машина осуществляет измельчение древесного сырья, в запасе m единиц сырья (рис. 2).

Здесь λ_1 – интенсивность поступления сырья на измельчение; μ_1 – интенсивность измельчения сырья.

Для одноплатформенной системы с запасом в общем виде алгебраические выражения для определения значений зависимостей вероятностей состояний оборудования от интенсивностей соответствующих событий равны

$$P_0 = \left[\frac{1 - \rho_1^{m+2}}{1 - \rho_1} \right]^{-1} = \frac{1 - \rho_1}{1 - \rho_1^{m+2}}; \quad (1)$$

$$P_1 = \rho_1 \cdot P_0; P_2 = \rho_1^2 \cdot P_0; \dots; P_{m+1} = \rho_1^{m+1} \cdot P_0. \quad (2)$$

В выражениях (1–4) параметр ρ_1 – коэффициент загрузки рубильной машины, который представляет собой отношение интенсивности подачи сырья на обработку к интенсивности обработки предмета труда ($\rho_1 \neq 1$):

$$\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}. \quad (3)$$

Вероятность работы рубильной машины определяется по выражению

$$P_p = 1 - P_0 = \frac{\rho_1 \cdot (1 - \rho_1^{m+1})}{1 - \rho_1^{m+2}}. \quad (4)$$

При работе одной рубильной машины вероятность простоя лесовозных автопоездов ввиду заполнения площадки ЛЭТ определяется по выражению

$$P_{np} = P_{m+1} = \rho_1^{m+1} \cdot P_0 = \frac{\rho_1^{m+1} \cdot (1 - \rho_1)}{1 - \rho_1^{m+2}}. \quad (5)$$

Для анализа работы на ЛЭТ нескольких однотипных рубильных машин воспользуемся теорией многоплатформенной лесопромышленной системы с запасом [5]. Для такой модели характерны следующие состояния: S_0 – рубильные машины технически исправны, но не работают из-за отсутствия сырья либо по другим организационным причинам; S_1 – измельчение древесного сырья осуществляет одна машина, остальные простаивают, запас пуст; S_2 – измельчение древесного сырья осуществляют две машины, остальные простаивают, запас пуст и т. д.; S_n – измельчение древесного сырья осуществляют n машин, запас пуст; S_{n+1} – измельчение древесного сырья осуществляют n машин, в запасе одна единица сырья и т. д.; S_{n+m} – измельчение древесного сырья осуществляют n машин, в запасе m единиц сырья (рис. 3).

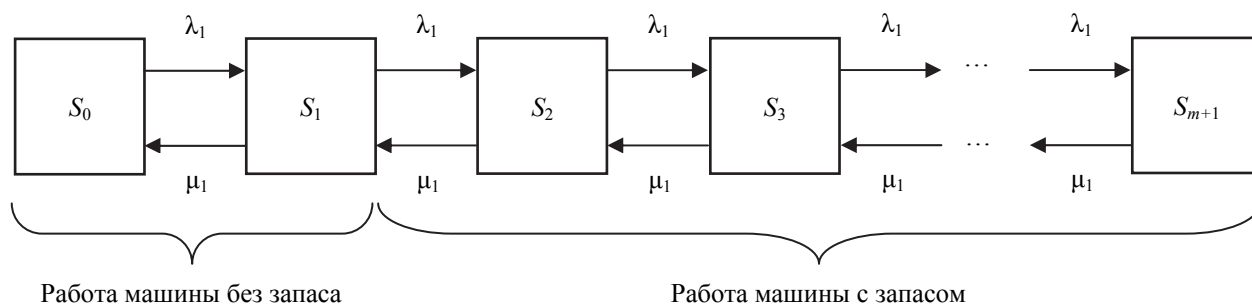


Рис. 2. Размеченный граф состояний одноплатформенной системы с запасом

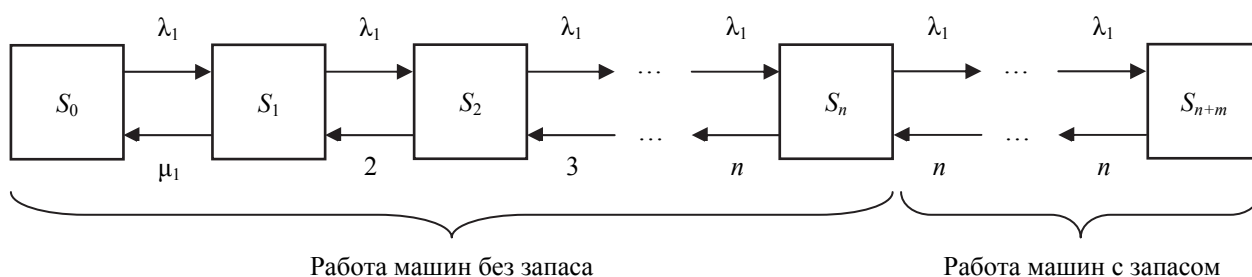


Рис. 3. Размеченный граф состояний многоплатформенной системы с запасом

Для многомашинной системы с запасом в общем виде алгебраические выражения для определения значений зависимостей вероятностей состояний оборудования от интенсивностей соответствующих событий равны

$$P_0 = \left[1 + \frac{\rho_1}{1!} + \frac{\rho_1^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_1^n}{n!} + \frac{\rho_1^n}{n!} \cdot \frac{\rho_1 - \left(\frac{\rho_1}{n}\right)^{m+1}}{1 - \frac{\rho_1}{n}} \right]^{-1}; \quad (6)$$

$$P_1 = \frac{\rho_1}{1} \cdot P_0; \quad P_2 = \frac{\rho_1^2}{2!} \cdot P_0; \quad \dots;$$

$$P_n = \frac{\rho_1^n}{n!} \cdot P_0; \quad P_{n+1} = \frac{\rho_1^{n+1}}{nn!} \cdot P_0; \quad (7-12)$$

$$P_{n+2} = \frac{\rho_1^{n+2}}{n^2 n!} \cdot P_0; \quad \dots; \quad P_{n+m} = \frac{\rho_1^{n+m}}{n^m n!} \cdot P_0.$$

Вероятность работы n рубильных машин в общем виде определяется по выражению

$$\begin{aligned} P_p &= P_n + P_{n+1} + P_{n+2} + \dots + P_{n+m} = \\ &= \frac{\rho_1^n}{n!} \left[1 + \frac{\rho_1}{n} + \frac{\rho_1^2}{n^2} + \dots + \frac{\rho_1^m}{n^m} \right] \cdot P_0 = \\ &= \frac{\rho_1^n}{n!} \left[\frac{1 - \left(\frac{\rho_1}{n}\right)^{m+1}}{1 - \frac{\rho_1}{n}} \right] \times \end{aligned} \quad (13)$$

$$\times \left[1 + \frac{\rho_1}{1!} + \frac{\rho_1^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_1^n}{n!} + \frac{\rho_1^n}{n!} \cdot \frac{\rho_1 - \left(\frac{\rho_1}{n}\right)^{m+1}}{1 - \frac{\rho_1}{n}} \right]^{-1}.$$

При работе n рубильных машин вероятность простоя лесовозных автопоездов ввиду заполнения площадки ЛЭТ определяется по выражению

$$P_{np} = P_{n+m} = \frac{\rho_1^{n+m}}{n^m n!} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{\rho_1}{1!} + \frac{\rho_1^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_1^n}{n!} + \frac{\rho_1^n}{n!} \cdot \frac{\rho_1 - \left(\frac{\rho_1}{n}\right)^{m+1}}{1 - \frac{\rho_1}{n}} \right]^{-1}. \quad (14)$$

На рис. 4 приведены теоретические исследования влияния величины межоперационного запаса сырья на вероятности загрузки рубильных машин и простоя автопоездов при работе многомашинных лесопромышленных систем.

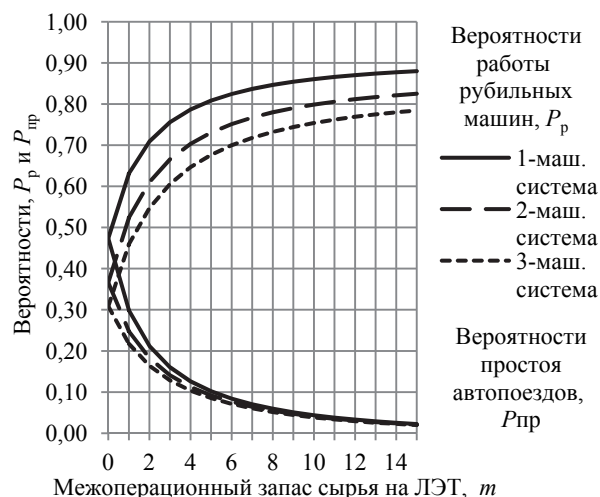


Рис. 4. Размеченный граф состояний рубильной машины

Заключение. На основании проведенных теоретических исследований установлено, что применение многомашинных систем в условиях ЛЭТ приводит к снижению простоя лесовозных автопоездов, обеспечивающих терминал древесным сырьем. В частности, при незначительных межоперационных запасах сырья на ЛЭТ использование трех рубильных машин снижает значение вероятности простоя автопоездов до 34% в сравнении с использованием одномашинной системы данного оборудования. При этом указанный параметр нивелируется с ростом величины межоперационного запаса древесного сырья.

В то же время применение многомашинных систем снижает загрузку основного технологического оборудования по измельчению древесного сырья. В частности, с увеличением количества рубильных машин на ЛЭТ от одной до трех снижает значение вероятности их одновременной работы на 11–34%.

Литература

1. Леонов Е. А., Федоренчик А. С. Оптимизация вместимости склада межсезонного хранения древесного топлива // Труды III Междунар. евразийского симпози. Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. 2008. С. 62–66.
2. Леонов Е. А. Исследование хранения древесного топлива у потребителей // Труды БГТУ. 2009. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 89–93.

3. Леонов Е. А. Модель склада древесного топлива // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 135–139.
4. Кулак М. И., Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Прогнозирование хранения запасов топлива в условиях лесозаготовительных терминалов // Наука и инновации. 2012. № 7. С. 69–72.
5. Леонов Е. А., Федоренчик А. С. Имитационное моделирование устойчивого функционирования склада древесного топлива // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 58–61.
6. Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Лесозаготовительные терминалы: оптимизация параметров // Лесное и охотничье хозяйство. 2012. № 9. С. 10–15.
7. Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Обеспечение устойчивого снабжения энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов // Лесной вестник. 2014. № S2. С. 146–150.
8. Игнатенко В. В., Леонов Е. А. Установление рациональных параметров многооперационных машин в лесозаготовительной промышленности // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 5–4. С. 291–295.
9. Леонов Е. А., Игнатенко В. В., Клоков Д. В. Математическая модель работы рубильной машины с учетом ее технических отказов // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 40–44.
10. Леонов Е. А. Устойчивое снабжение энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 17–19.
11. Клоков Д. В., Леонов Е. А., Турлай И. В. Модель работы форвардера с учетом надежности // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 23–26.
12. Клоков Д. В., Турлай И. В., Леонов Е. А. Оборудование лесопромышленных предприятий. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2015. 200 с.
13. Технология и оборудование комплексного использования древесного сырья. Практикум / А. С. Федоренчик [и др.]. Минск: БГТУ, 2014. 274 с.
14. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Энергетическое использование древесной биомассы. Практикум. Минск: БГТУ, 2015. 212 с.
15. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Минск: БГТУ, 2016. 204 с.

References

1. Leonov E. A., Fedorenchik A. S. Optimization of the storage capacity of the off-season storage of wood fuel. *Trudy III Mezhdunar. evraziyskogo simpoziuma* [Proceedings of III International The Eurasian Symposium], 2008, pp. 62–66 (In Russian).
2. Leonov E. A. Research of storage of wood fuel from consumers. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2009, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 89–93 (In Russian).
3. Leonov E. A. Model of wood fuel storage. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 135–139 (In Russian).
4. Kulak M. I., Fedorenchik A. S., Leonov E. A. Forecasting the storage of fuel reserves in the context of forest energy terminals. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovation], 2012, no. 7, pp. 69–72 (In Russian).
5. Leonov E. A., Fedorenchik A. S. Simulation modeling of sustainable functioning of wood fuel storage. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 58–61 (In Russian).
6. Fedorenchik A. S., Leonov E. A. Forest energy terminals: optimization of parameters. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and Hunting], 2012, no. 9, pp. 10–15 (In Russian).
7. Fedorenchik A. S., Leonov E. A. Ensuring sustainable supply of energy facilities with wood fuel with the creation of the minimum required reserves. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2014, no. S2, pp. 146–150 (In Russian).
8. Ignatenko V. V., Leonov E. A. Establishment of rational parameters of multi-operation machines in the timber industry. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, no. 5–4, pp. 291–295 (In Russian).
9. Leonov E. A., Ignatenko V. V., Klovok D. V. The mathematical model of chipper work given its technical failures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 40–44 (In Russian).
10. Leonov E. A. Sustainable supply of wood fuel energy facilities with the establishment of minimum required reserves. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 17–19 (In Russian).
11. Klovok D. V., Leonov E. A., Turlay I. V. Model of forwarder work in respect of reliability. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 23–26 (In Russian).

12. Klovov D. V., Turlay I. V., Leonov E. A. *Oborudovaniye lesopromyshlennykh predpriyatiy. Laboratornyy praktikum* [Equipment timber companies. Laboratory practicum]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 200 p.
13. Fedorenchik A. S., Mokhov S. P., Klovov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye kompleksnogo ispol'zovaniya drevesnogo syr'ya. Praktikum* [Technology and equipment for the integrated use of wood raw material. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 274 p.
14. Fedorenchik A. S., Klovov D. V., Leonov E. A. *Energeticheskoye ispol'zovaniye drevesnoy biomassy. Praktikum* [Energy use of wood biomass. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 212 p.
15. Fedorenchik A. S., Klovov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesosechnykh i lesoskladskikh rabot* [Energy use of wood biomass. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2016. 204 p.

Информация об авторах

Леонов Евгений Анатольевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: debager13@rambler.ru

Клоков Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: klokov_dm@belstu.by

Information about the authors

Leonov Evgeniy Anatol'evich – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Forestry Machinery and Logging Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: debager13@rambler.ru

Klovov Dmitriy Viktorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Forestry Machinery and Logging Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: klokov_dm@belstu.by

Поступила 20.04.2017